

論文の内容の要旨

論文題目 極座標に着目した永久磁石同期モータの 電圧制限下での高応答化に関する研究

氏 名 宮島孝幸

永久磁石同期モータ(PMSM)は高効率、高出力密度という利点から、産業界で広く用いられている。さらなる高効率化、小型化のために PMSM の高回転数駆動が求められているが、高回転数領域ではインバータの出力電圧が飽和し、駆動領域を制限される。そこで、昇圧コンバータの利用やインバータの過変調領域、ワンパルスモード、PMSM の弱め磁束制御によって広い駆動領域を達成している。本論文では非線形領域となる弱め磁束領域でのトルク制御に着目し、高応答化を目的とした。弱め磁束領域では電圧振幅が常に飽和した状態となり、電圧位相のみが制御入力となる。このため、従来の直交座標での制御入力を用いた手法では高帯域化が困難である。また、電圧位相でトルクを制御する手法が存在するが、厳密な設計法が提案されていない。

本論文の前半部では極座標系の制御入力である電圧振幅、電圧位相に着目したフィードバック制御を提案した。線形化したプラントモデルを用い、可変ゲインの厳密なモデルベース電圧位相制御器を提案した。これに電圧振幅を併用し、電圧制限内まで電圧位相制御の範囲を拡大させ、制御器の切り替え回数を削減した。後半部では電圧位相を入力とする線形化モデルの零点に着目し、電圧制限下での d, q 軸電流、トルクの達成性能限界を解析した。

本論文の内容及び構成を以下に示す。

第 1 章では、永久磁石同期モータ電圧制限下での高応答化の研究を振り返り、それらの有効点や問題点を明らかにし、本研究の位置付けを行なった。電圧制限下では電圧位相のみが入力となり、一般的な直交座標系での制御入力を用いる制御手法では高帯域化が望めない。一方で、電圧位相を用いてトルクを制御する電圧位相制御が提案されているが、プラント特性を厳密に考慮されていない。また、最適制御理論を用いた最適電流軌道の生成やモデル予測制御などによって電流軌道の最適化が行われてきたが、達成性能限界が不明瞭であった。本論文では線形化モデルを近似せず、極座標系での制御入力を用いた弱め磁束制御の厳密なモデルベース設計を提案する。さらには線形化モデルの零点に着目し、達成性能限界を解析する。

第 2 章では本論文で使用する永久磁石同期モータの dq 座標モデルについて説明した。従来から電圧位相について線形化した dq 座標電圧方程式を、 V/f 制御の安定化解析や変調率フィードバック制御のトルク指令値フィルタ設計、近似して電圧位相制御器の設計に用いられていた。本研究では、極座標系での制御入力を使って制御するため、電圧振幅についても線形化して制御系設計に用いる。そして、達成性能限界の解析と全弱め磁束領域で使える厳密な設計のため近似をしない。さらに、推定トルクを制御するために IPMSM のトルクについても線形化し、電圧振幅と電圧位相からトルクまでの伝達関数を導出する。

第 I 部では、電圧制限下の永久磁石同期モータのフィードバック制御の高帯域化について取り上げている。第 3 章では、近似をしない線形化モデルを用い、全弱め磁束領域で適用可能なモデルベース電圧位相制御器を提案した。提案法は動作点に応じて線形化モデルを再定義する機構を加えており、可変ゲインの制御器となる。これを高出力モータで実機検証を行い、有効性と問題点を示した。さら

には、この実験結果を踏まえて状態フィードバック制御に基づく電圧位相制御を提案した。

電圧位相制御では、制御器の切り替えが必要となる。しかし、線形領域の電流ベクトル制御では直交座標系での制御入力を用いており、対する電圧位相制御では極座標系での制御入力であり、制御入力が異なる。そこで、第4章では線形領域で極座標での制御入力を用いた電流制御について、可制御性から議論した。その結果から、電圧位相で d 軸電流、電圧振幅で q 軸電流を制御する手法を簡易設計し、シミュレーションおよび実験結果から問題点を示した。

第5章では電圧位相制御の切り替えという問題点に対して、電圧振幅の併用によって電圧制限内まで電圧位相制御器の動作範囲を拡大させ、疑似的なシームレス制御を実現させた。さらに、電圧振幅制御器と電圧位相制御器を統合設計した制御法を提案し、滑らかなトルク応答を実現しつつ、電圧制限内、電圧制限下で所望の特性を実現させた。

第II部では、電圧制限下での永久磁石同期モータの達成性能限界について取り上げた。

第6章では第2章で示した線形化モデルの零点に着目し、その大きさを解析することで達成性能限界を示した。線形化モデルで解析できるのは小信号の場合である。そこで、大信号の場合について、過渡項を考慮した電圧制限楕円の中心座標の推移から解析し、線形化解析との異なる点について示した。従来の電圧制限楕円では定常状態で達成できる d 、 q 軸電流値を表すものである。一方、過渡項を考慮した電圧制限楕円は d 、 q 軸電流の微分値を表すものであり、中心座標の推移から電圧制限下での電流応答を解析できる。過渡項を考慮した電圧制限楕円では大信号を取り扱える一方、トルクと達成性能限界の傾向は解析できない。

第7章では第3章で提案した状態フィードバックに基づく電圧位相制御と第6章で解析した達成性能限界をトルクステップ応答で比較し、解析結果と傾向の一致を確認した。この比較はフィードバック制御器で小信号での検討にすぎない。そこで、第8章ではPMSMの逆システムに基づくフィードフォワード制御、終端状態制御制御に基づく最短時間電流軌道、準最短時間トルク軌道の3つの軌道を用い、第6章での解析結果を比較した。その結果、第6章において過渡項を考慮した電圧制限楕円から得られた大信号での達成性能限界を確認した。また、大信号ではあるが整定時間とオーバーシュート量、アンダーシュート量のトレードオフを確認し、また線形化モデルから得られた結果と動作点による達成性能限界の変化の傾向の一致を確認した。

第10章は、永久磁石同期モータの電圧制限下での高応答化に対するアプローチを振り返り、本論文のまとめとした。